



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

SIMULAČNÍ MODELOVÁNÍ PARALELNÍHO MECHANISMU TYPU RPR

SIMULATION MODELING OF RPR PARALLEL KINEMATIC MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN HVÍŽĎALA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ BŘEZINA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Hvízdala

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Simulační modelování paralelního mechanismu typu RPR

v anglickém jazyce:

Simulation modeling of RPR parallel kinematic machine

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Sestavte model kinematiky a dynamiky paralelního mechanismu typu RPR ve vhodném simulačním prostředí. Chování modelu porovnejte s chováním již dostupného modelu sestaveného v prostředí Matlab – SimMechanics, který pro tyto účely vhodně upravte.

Cíle bakalářské práce:

1. proveďte stručnou rešerši metod modelování paralelních mechanismů
2. sestavte simulační model kinematiky a dynamiky paralelního mechanismu typu RPR ve vhodném simulačním prostředí
3. pro účely porovnání vhodně upravte dostupný model v Matlab SimMechanics
4. porovnejte chování obou modelů

Seznam odborné literatury:

Merlet, J.P.: Parallel robots, Springer, 2006

Stejskal, V.: Singulární případy paralelního robota, sborník konference Výpočtová mechanika '97,

Pernink, 1997, str. 255 – 260

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Březina, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 5.11.2010

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá simulačním modelováním paralelního mechanismu typu RPR. V práci je popsána metodika tvorby simulačního modelu. Pro úspěšné vypracování bylo nutné sestavit kinematický a dynamický model mechanismu v programu MSC Adams, který byl porovnáván s modelem, který byl vytvořen v MATLAB/SimMechanics.

Abstrakt

The work is dealing with simulation modeling of a parallel kinematic machine RPR. There is described an approach of creating the simulation model. There was constructed a model of kinematics and dynamics of the mechanism in MSC Adams which was consequently compared with the model created in MATLAB/SimMechanics.

Klíčová slova

3-RPR, paralelní mechanismus, simulační modelování, inverzní kinematika

Keywords

3-RPR, parallel mechanism, simulation modeling, inverse kinematics

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Březinovi, Ph.D. za vedení, odborné konzultace, cenné rady a poskytnuté parametry.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně na základě svých vědomostí, rad a pokynů vedoucího bakalářské práce, poskytnutých materiálů a odborných konzultací.

V Pardubicích, dne 13.5.2011

.....

Jan Hviždala

Bibliografická citace

HVÍŽD'ALA, J. *Simulační modelování paralelního mechanismu typu RPR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 36s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Březina, Ph.D.

Obsah

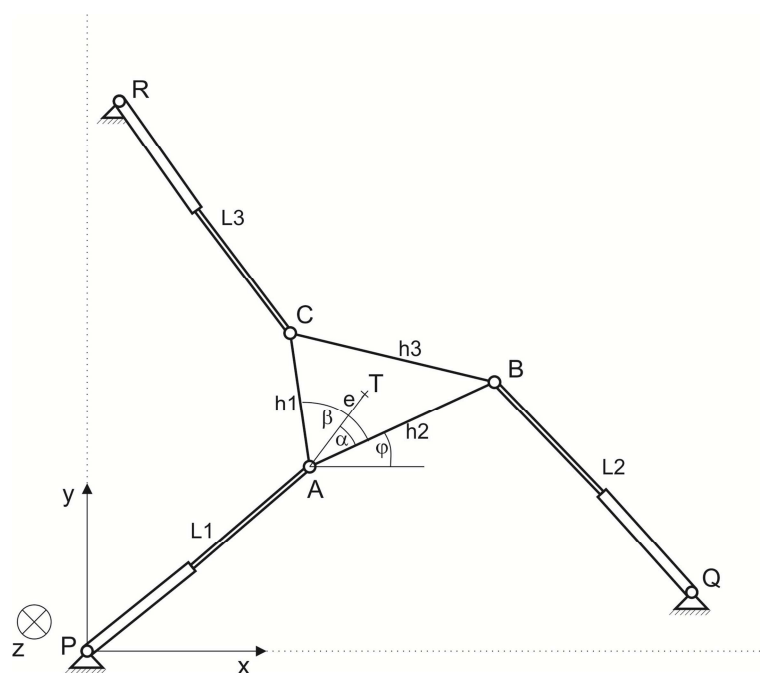
1.	Úvod.....	6
2.	Přehled metod modelování paralelních mechanismů.....	8
	2.1 Metody modelování kinematického modelu.....	8
	2.2 Metody modelování dynamického modelu.....	8
3.	Výpočet mobility mechanismu.....	9
4.	Kinematické vztahy.....	10
	4.1. Inverzní kinematika.....	10
	4.2. Přímá kinematika.....	11
5.	Vytvoření simulačního modelu.....	12
	5.1. Modelování 3D modelu v SolidWorks.....	12
	5.2. Model v MSC Adams.....	12
	5.3. Model v MATLAB/SimMechanics.....	14
6.	Simulace kinematických vlastností mechanismu.....	17
	6.1. Simulace v MSC Adams.....	17
	6.2. Simulace v MATLAB/SimMechanics.....	18
	6.3. Porovnání veličin.....	19
7.	Simulace inverzní kinematiky.....	21
	7.1. Simulace v MSC Adams.....	22
	7.2. Simulace v MATLAB/SimMechanics.....	24
	7.3. Porovnání veličin.....	26
8.	Simulace dynamických vlastností mechanismu.....	29
	8.1. Simulace v MSC Adams.....	29
	8.2. Simulace v MATLAB/SimMechanics.....	29
	8.3. Porovnání veličin.....	30
9.	Závěr.....	32
10.	Odkazy.....	34
11.	Použité veličiny a jednotky.....	35

1. Úvod

Paralelní manipulátor je mechanismus, který se skládá z uzavřené smyčky kinematického řetězce, kde je koncový efektor spojen se základním tělesem pomocí několika nezávislých kinematických paralelních řetězců. Efektor je koncový člen manipulátoru (nesoucí chapadlo nebo jiný manipulační nástroj), který plní požadované příkazy, např. posun do polohy, natočení atd.

Systémy s paralelní kinematickou strukturou umožňují dosáhnout požadované pozice s větší rychlostí, přesností i opakovatelností než běžné mechanické systémy se sériovou kinematickou strukturou. Tyto vlastnosti souvisí s vysokou tuhostí celé konstrukce a možností umístění pohonů na rám. Naproti tomu, nevýhodou je potom menší pracovní prostor omezený singulárními oblastmi.

Mechanismus 3 – RPR je rovinný paralelní mechanismus se třemi stupni volnosti (obr. 1.1). Název mechanismu je odvozen od jeho struktury, kde 3-RPR jsou zkratky jednotlivých vazeb (Revolute, Prismatic, Revolute) použitých v rámci každého z ramen. Základem mechanismu je tedy trojice ramen, které mají strukturu: rotační vazba - tuhé těleso - prismatická vazba - tuhé těleso - rotační vazba. Ramena jsou připojena pomocí rotačních vazeb k základnímu tělesu a pracovní plošině.



Obr. 1.1 Paralelní mechanismus typu RPR

Jednotlivá ramena pak mohou být podle obr. 1.1 popsána jako AP, BQ, CR. Se základním tělesem jsou spojena rotačními vazbami P, Q, R a s pracovní plošinou vazbami A, B, C. Ramena jsou složena ze dvou částí, které jsou spojeny posuvnou vazbou. Okamžitá poloha a orientace pracovní plošiny ABC, respektive těžiště T, jsou určeny třemi veličinami: x_T, y_T, φ , které jsou pak z hlediska inverzní kinematiky označovány jako vstupní. Výstupní veličiny jsou potom délky vysunutí ramen L_1, L_2, L_3 . Konstrukčními parametry jsou souřadnice vazeb P, Q, R, rozměry pracovní plošiny $h_1, h_2, h_3, \alpha, \beta, \varphi, e$ a délka horní a spodní části ramene l.

Pro modelování robotických soustav jsou v současné době používány různé nástroje pro simulaci a vyhodnocení modelů. Ne všechny simulační nástroje ale zaručují stejné výsledky při vyhodnocení totožného modelu. Cílem práce je sestavit simulační model mechanismu ve vhodném simulačním prostředí a porovnat jeho chování s chováním dostupného modelu v Matlab – SimMechanics. Jako vhodné simulační prostředí byl pro svou rozšířenost a dostupnost na univerzitě zvolen software MSC Adams.

2. Přehled metod modelování paralelních mechanismů

2.1 Metody modelování kinematického modelu

Modelování kinematiky paralelního mechanismu, může být řešeno přímou nebo inverzní metodou. Inverzní kinematické rovnice slouží k výpočtu délek ramen manipulátoru, když je známá poloha pracovní plošiny a její natočení. Pro paralelní manipulátory je odvození inverzních rovnic poměrně jednoduchý proces. Rovnice jsou odvozeny, buď metodou transformačních matic [1], nebo pomocí geometrických metod [2].

Opakem inverzní úlohy kinematiky je úloha přímá. Přímé kinematické rovnice jsou používány k nalezení polohy pracovní plošiny při známé délce ramen. Na rozdíl od sériových robotů je řešení přímých kinematických rovnic pro paralelní manipulátor v důsledku jejich nelinearity poměrně komplikované. Z tohoto důvodu se pro jejich řešení často používá kombinace metod analytických a numerických [3].

2.2 Metody modelování dynamického modelu

Model dynamiky je důležitý pro řízení manipulátoru zejména v případech, kdy dochází k pohybu s velkými zrychleními nebo přesouvání těžkých břemen. Negativní stránka modelu popisujícího plnou dynamiku mechanismu je potom jeho časová náročnost při výpočtu.

Metody modelování dynamicky jsou postaveny na několika základních principech. Newton-Eulerův princip [4], Hamiltonův princip [5], řešení pomocí Lagrangeových rovnic [6], nebo za použití kombinace některých principů např. kombinace Lagrangeových rovnic a Newton-Eulerového principu [7]. Definice dynamiky prostorového paralelního manipulátoru, jednou z těchto metod, je poměrně komplikovaná a numerické řešení požadovaného modelu je obvykle časově náročné. Proto se model často zjednodušuje, což ale vede k nepřesnostem v chování modelu. Taková definice je potom, mimo jiné, nevhodná pro přesný návrh řízení manipulátoru. Častým zjednodušením je, například, zanedbání setrvačných momentů ramen manipulátoru a zároveň předpoklad hmotnosti na jejich koncích [8].

V poslední době je nejčastěji užívaný způsob sestavení dynamického modelu pomocí simulačních programů. Nejčastěji používané programy jsou MSC Adams, MATLAB/SimMechanics, Autodesk Inventor, SolidWorks. Výhodou je, že tyto programy umožňují práci s modelem komplexně (vytvořit model, ovládat model, spojovat jednotlivé modely atd.). Tyto vlastnosti jsou velice účinným nástrojem pro „Rapid prototyping“ nebo pro klasický mechatronický přístup, kde se bere v úvahu, že všechny fáze návrhu jsou vzájemně propojené a ovlivňují se navzájem. Toto je důvod, proč mají v praxi simulační programy největší zastoupení při vytváření dynamického modelu.

3. Výpočet mobility řešeného mechanismu

Mobilita mechanismu, je dána počtem stupňů volnosti podle vztahu

$$i = i_v(n_t - 1) - \sum_{j=1}^{n_v} \xi_j \quad (3.1)$$

kde i_v je počet stupňů zastupující prostor (pro 2D $i_v = 3$, pro 3D $i_v = 6$), n_t je počet těles, n_v je počet vazeb a ξ_j je počet stupňů volnosti odebraných jednotlivými vazbami.

Daný mechanismus 3-RPR je rovinný, proto $i_v = 3$. Skládá se z pracovní plošiny, základního tělesa a tří ramen, které mají dva členy.

$$n_t = 3 \cdot 2 + 1 + 1 = 8 \quad (3.2)$$

Ramena jsou vázána dvěma rotačními vazbami a jednotlivé členy spojuje posuvná vazba. Pro rotační vazbu je $\xi_r = 2$, pro posuvnou $\xi_p = 2$. Rotačních vazeb je celkem šest, posuvné jsou tři.

$$\sum_{j=1}^{n_v} \xi_j = 2 \cdot 6 + 2 \cdot 3 = 18 \quad (3.3)$$

Dosazením do vztahu (3.1) dostaneme

$$i = 3(8 - 1) - 18 = 3^\circ V. \quad (3.4)$$

Soustava má tři stupně volnosti. Může se pohybovat ve směru osy x, y a rotovat kolem osy z.

4. Kinematické vztahy

Níže uvedené rovnice (4.1), (4.2), (4.3) tvoří základ pro výpočet přímé a inverzní kinematiky mechanismu. Jedná se o analytický popis geometrie mechanismu [3].

$$(x_T - e \cos(\varphi + \alpha))^2 + (y_T - e \sin(\varphi + \alpha))^2 - L_1^2 = 0 \quad (4.1)$$

$$(x_Q - (x_T - e \cos(\varphi + \alpha)) - h_2 \cos(\varphi))^2 + ((y_T - e \sin(\varphi + \alpha)) - y_Q + h_2 \sin(\varphi))^2 - L_2^2 = 0 \quad (4.2)$$

$$((x_T - e \cos(\varphi + \alpha)) - x_Q + h_3 \cos(\varphi + \beta))^2 + (y_Q - (y_T - e \sin(\varphi + \alpha)) - h_3 \sin(\varphi + \beta))^2 - L_3^2 = 0 \quad (4.3)$$

Kde $[x_T \ y_T]$ jsou souřadnice bodu T, $[x_Q \ y_Q]$ jsou souřadnice bodu Q, $[x_R \ y_R]$ jsou souřadnice bodu R.

4.2 Inverzní kinematika

Rovnice inverzní kinematiky dovoluje spočítat závislé proměnné L_1 , L_2 , L_3 v závislosti na vstupních parametrech x_T , y_T a φ .

$$L_1 = f_1(x_T, y_T, \varphi) \quad (4.4)$$

$$L_2 = f_2(x_T, y_T, \varphi) \quad (4.5)$$

$$L_3 = f_3(x_T, y_T, \varphi) \quad (4.6)$$

Tyto rovnice jsou nezbytné pro řízení pozice manipulátoru. Jsou odvozené z rovnic (4.1), (4.2), (4.3) jako:

$$L_1 = \sqrt{(x_T - e \cos(\varphi + \alpha))^2 + (y_T - e \sin(\varphi + \alpha))^2} \quad (4.7)$$

$$L_2 = \sqrt{(x_Q - (x_T - e \cos(\varphi + \alpha)) - h_2 \cos(\varphi))^2 + ((y_T - e \sin(\varphi + \alpha)) - y_Q + h_2 \sin(\varphi))^2} \quad (4.8)$$

$$L_3 = \sqrt{((x_T - e \cos(\varphi + \alpha)) - x_Q + h_3 \cos(\varphi + \beta))^2 + (y_Q - (y_T - e \sin(\varphi + \alpha)) - h_3 \sin(\varphi + \beta))^2} \quad (4.9)$$

Na základě vstupních a konstrukčních parametrů jsme schopni z těchto rovnic spočítat aktuální délky ramen.

4.2 Přímá kinematika

Rovnice přímé kinematiky představují významný problém v analýze paralelních manipulátorů. Vzhledem ke své nelinearitě se tyto rovnice většinou nedají řešit analyticky. Pro většinu případů se proto volí řešení numerické. Pomocí přímé kinematiky lze spočítat polohu těžiště x_T, y_T a φ na základě odměření délky vysunutí jednotlivých ramen L_1, L_2, L_3 .

$$x_T = f_x(L_1, L_2, L_3) \quad (4.10)$$

$$y_T = f_y(L_1, L_2, L_3) \quad (4.11)$$

$$\varphi_T = f_\varphi(L_1, L_2, L_3) \quad (4.12)$$

Řešení přímé kinematiky pomocí kombinace analytických a numerických metod se zabývá [3].

5. Vytvoření simulačního modelu

5.1 Modelování 3D modelu v SolidWorks 2010

Pro vytvoření 3D modelu byl vybrán program SolidWorks 2010 a následný export modelu do formátu Parasolid, který je podporován pro import do MSC Adams.

Konstrukční parametry modelu (značeno v obr. 1.1) byly stanoveny na základě poskytnutého SimMechanics modelu jako:

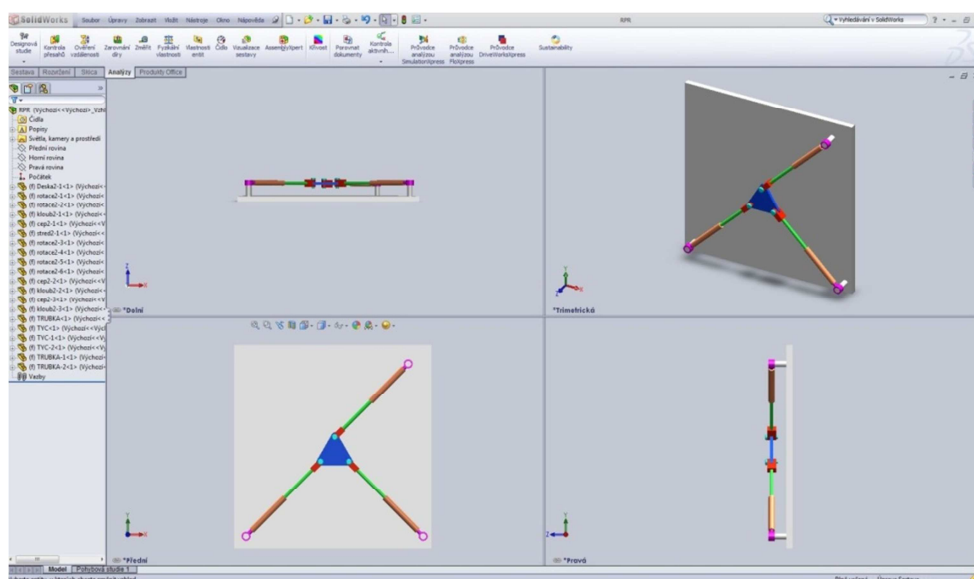
$$l = 87\text{mm}, \varnothing d = 5\text{mm}, \varnothing D = 8\text{mm}, h_1 = h_2 = dh_3 = 50\text{mm},$$

$$\alpha = 30^\circ, \beta = 60^\circ.$$

Body vazeb na základním tělese jsou potom:

$$P = [0 \ 0], \quad Q = [289 \ 25], \quad R = [0 \ 296].$$

Pro pozdější posouzení dynamiky mechanismu bylo zapotřebí navrhnout i materiály jednotlivých dílů. Pro všechny díly byla zvolena ocel o hustotě $\rho = 7800\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

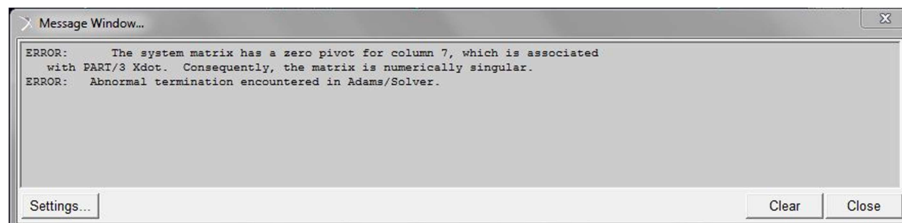


Obr.5.1 3D model 3-RPR mechanismu v SolidWorks

5.2 Model v MSC Adams R3

V programu MSC Adams je možné přímo modelovat základní geometrické součásti a následně jim přiřadit momenty setrvačnosti a hmotnosti spočítané v CAD prostředí. Nicméně, jedním z vedlejších cílů bylo popsat možnosti importu CAD modelů do Adamsu a z tohoto důvodu byla zvolena tato varianta.

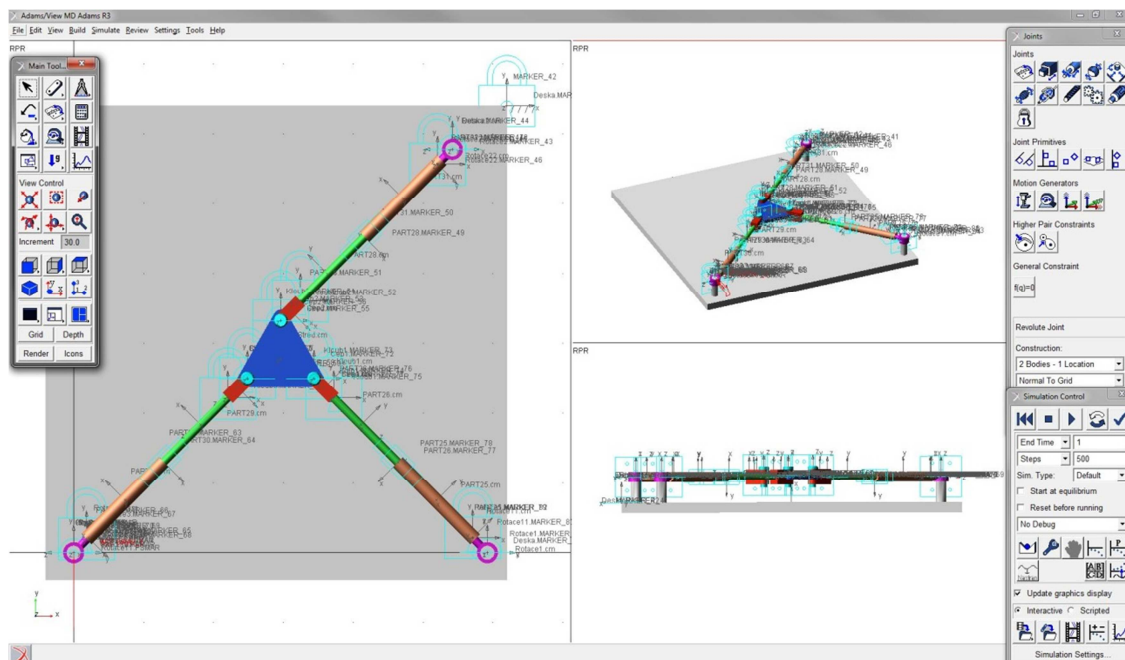
Jako soubor pro import byl použit již zmíněný model ve formátu Parasolid. Po importování modelu do MSC Adams byla celá sestava umístěna ve stejné pozici jako CAD model. Při exportu se ale ztratili veškeré vazby a tím tedy i kompaktnost celého modelu. Další problém nastal při přidání nové vazby do modelu. Při spuštění simulace se vždy vyskytla následující chyba:



Obr. 5.2 chybová hláška MSC Adams

Nový model pro import byl vytvořen v CAD systému ProEngineer Wildfire 5. Zmíněná chyba byla následně odstraněna při exportu díky možnosti ignorovat vrstvy. Po této volbě a importu do MSC Adams, byl součástí každého dílu viditelný souřadný systém. Porovnáním s předchozím modelem exportovaným ze systému SolidWorks bylo zaznamenáno, že souřadný systém je zde jen u některých součástí. Na základě této skutečnosti bylo usouzeno, že export do formátu parasolidu ze SolidWorks se nevytvořil kompletní.

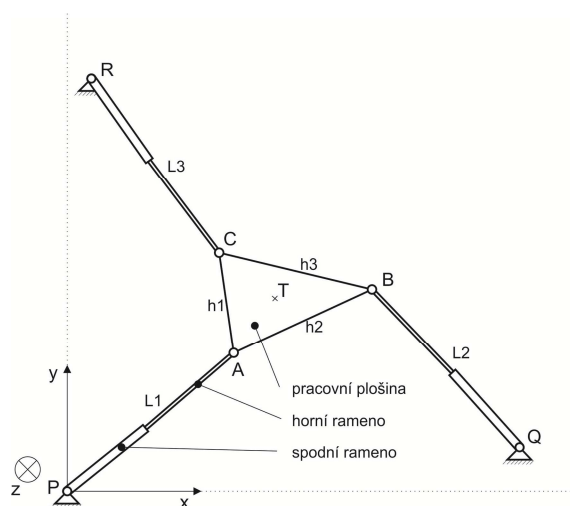
Druhá možnost opravy zmíněné chyby byla výměna dílů, které neměly souřadný systém za díly vytvořené v ProEngineeru. Přidání kinematických vazeb dále již nebyl problém.



Obr. 5.3 Simulační model v MSC Adams

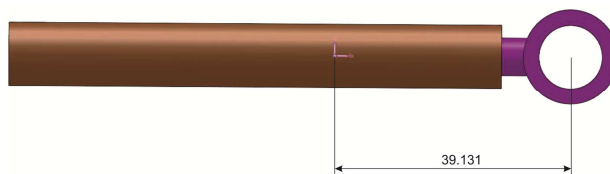
5.3 Model v Matlab SimMechanics 2010

Základní model mi byl poskytnut [9]. Model však byl pouze orientační a bylo nutné ho upravit, aby měl stejné dynamické vlastnosti jako model v MSC Adams. Všechny rozměry byly zachovány, bylo jen potřeba upravit polohy těžišť (T), momenty setrvačnosti (SM) jednotlivých prvků modelu a hmotnosti (M). Dané parametry byly vyčteny z modelu vytvořeného v SolidWorks.



Obr. 5.4 Názvy součástí 3-RPR mechanismu

Dolní rameno:

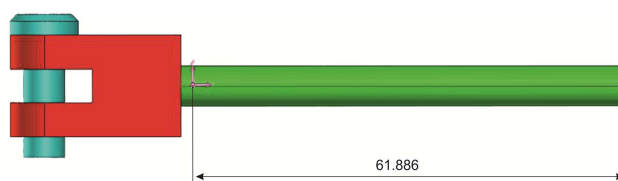


Obr. 5.5 Těžiště dolního ramene 3-RPR mechanismu

$$SM \text{ dolní rameno} = \begin{pmatrix} 0.00000076 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0003553 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00003562 \end{pmatrix}$$

$$M \text{ dolní rameno} = 0.04263979$$

Horní rameno:

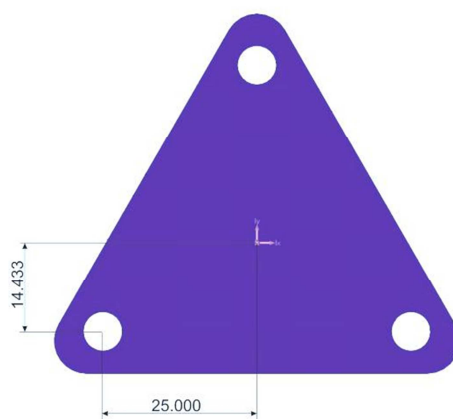


Obr. 5.6 Těžiště horního ramene 3-RPR mechanismu

$$SM_{\text{horní rameno}} = \begin{pmatrix} 0.00000098 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0002530 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00002580 \end{pmatrix}$$

M horní rameno: 0.04262953

Pracovní plošina:

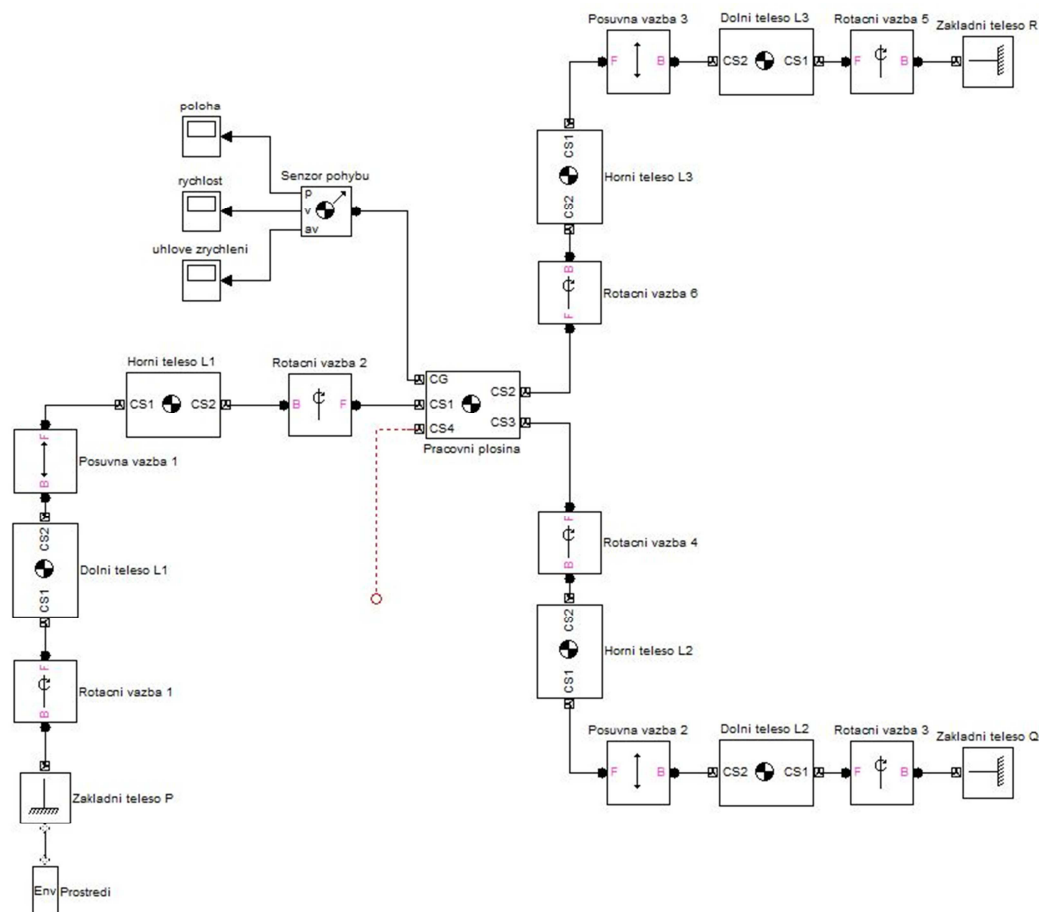


Obr. 5.7 Těžiště pracovní plošiny 3-RPR mechanismu

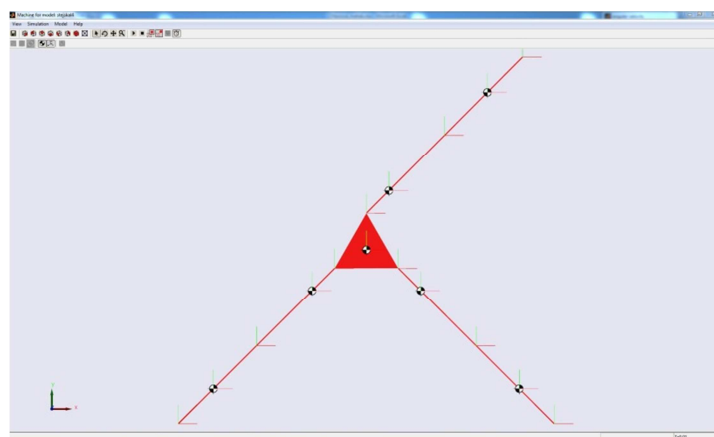
$$SM_{\text{pracovní plošina}} = \begin{pmatrix} 0.00001444 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00001444 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00002856 \end{pmatrix}$$

M Pracovní plošina: 0.07743743

Na obr. (5.8) je potom znázorněno blokové schéma mechanismu V Matlab - SimMechanics. Uprostřed je pracovní plošina, ke které jsou vázána tři ramena. K těžišti plošiny je přiveden senzor pohybu pro měření polohy, rychlosti a zrychlení. Do vstupu CS4, který je svázán s těžištěm, je později přiveden zdroj pohybu.



Obr. 5.8 Blokové schéma 3-RPR mechanismu



Obr. 5.9 vizualizace modelu v prostředí MATLAB/SimMechanics.

6. Simulace kinematických vlastností mechanismu

Pro odzkoušení kinematických vlastností mechanismu byl použit obecný pohyb, který byl předepsán těžišti pracovní plošiny. Mechanismus má, jak je vidět z rovnice (3.4), tři stupně volnosti. Translaci v osách x , y a rotaci kolem osy z . Jako řídicí rovnice byly pro simulační účely použity:

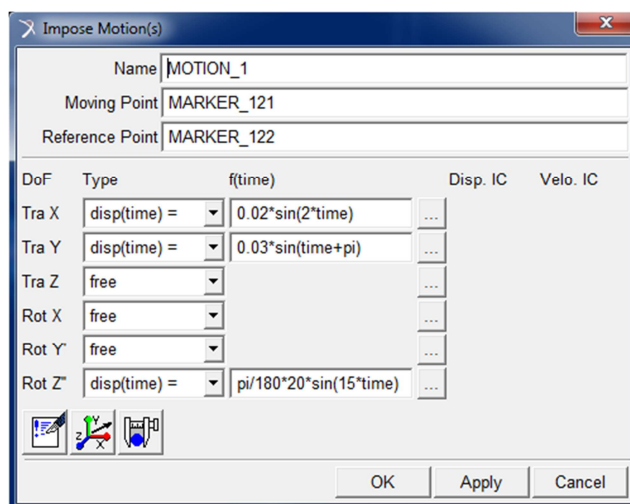
$$x: 0.02 \cdot \sin(2 \cdot \text{time}) \quad (6.1)$$

$$y: 0.03 \cdot \sin(\text{time} + \pi) \quad (6.2)$$

$$z: \pi/180 \cdot 20 \cdot \sin(15 \cdot \text{time}) \quad (6.3)$$

6.1 Simulace v MSC Adams

Předepsání pohybu v MSC Adams je dosaženo prvkem *Motion*. Pro daný případ byl využit *general motion*. Tento prvek má možnost pohybovat součástí v 6 stupních volnosti. Tento mechanismus má však pouze 3 stupně volnosti, proto bylo nutné ve zbývajících 3 stupních (translace v ose z a rotace v osách x a y) zvolit volný „free“ pohyb viz obr. 6.1. Tato možnost je nastavena jako výchozí. Pro řízené stupně volnosti byly zvoleny rovnice (6.1), (6.2), (6.3). V tomto programu je možné zvolit pouze jednu vstupní funkci (polohu, rychlost nebo zrychlení), na rozdíl od SimMechanics, kde uživatel musí zadat všechny tři.

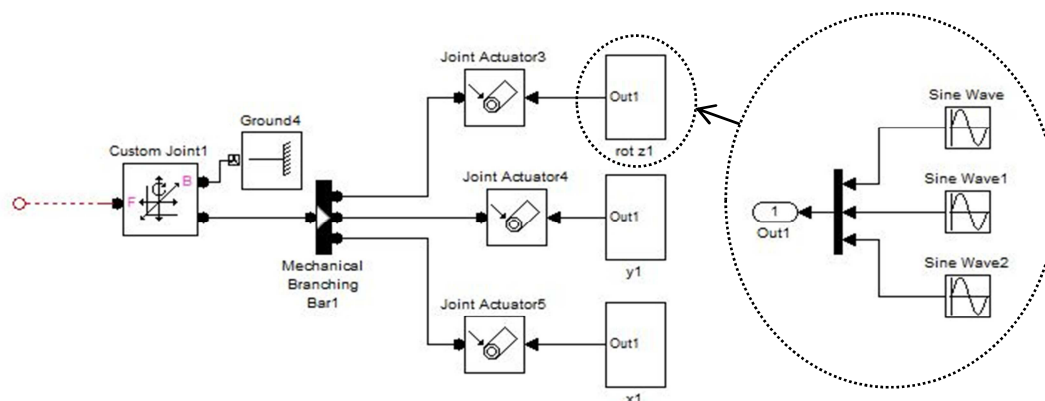


Obr. 6.1 Nastavení prvku Motion

Výsledné veličiny, tj. grafy, byly vygenerovány v modulu Adams/PostProcessor. Dále byly vyexportovány jako tabulka do formátu .html, přeuloženy do formátu .xls a nainportovány do Matlabu. Všechny grafy byly zpracovány v modulu Matlab Figures pro lepší porovnání.

6.2 Simulace v MATLAB/SimMechanics

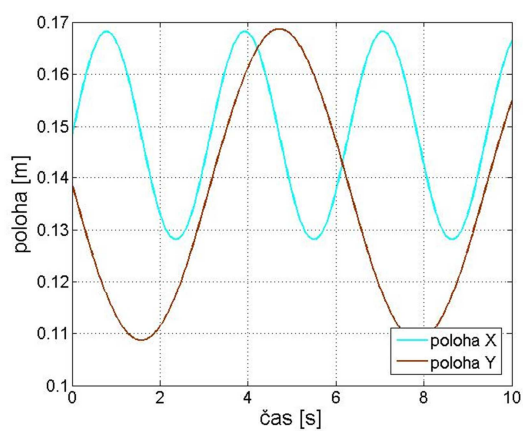
Pro řízení pohybu se v SimMechanics připojí k požadovanému bodu (CS4 - těžiště) potřebný aktuátor. Aktuátor je možné umístit k nějakému bodu tělesa (*body actuator*) nebo přiřadit k vazbě (*joint actuator*). Pro daný model bylo nejvýhodnější vytvořit v těžišti pracovní plošiny obecnou vazbu a pro každý stupeň volnosti přiřadit jeden aktuátor (obr. 6.2). Řídící rovnice jsou harmonické, proto byl zvolen pro vstup do aktuátoru prvek *SineWave*. Jeho výstup je dán rovnicí $O(t) = Amp * Sin(Freq * t + Phase)$. Pro vstup do aktuátoru jsou potřeba tři veličiny, poloha, rychlost a zrychlení. Tyto další veličiny získáme derivací rovnice polohy. Jednotlivé vstupy tvoří blok Out1.



Obr. 6.2 Blokové schéma řízení pohybu

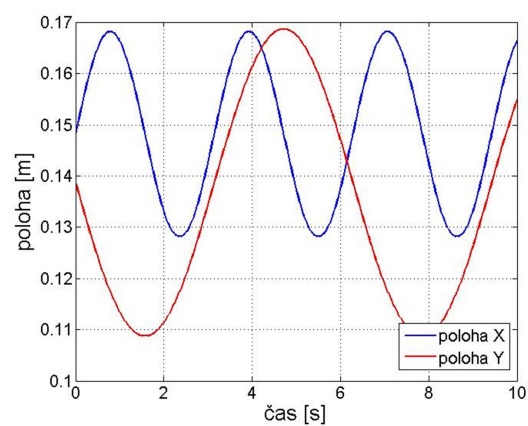
6.3 Porovnávání veličiny

MATLAB/SimMechanics

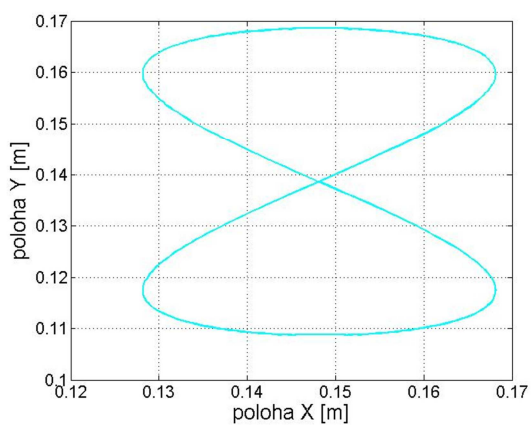


Graf 6.1 Poloha těžiště pracovní plošiny

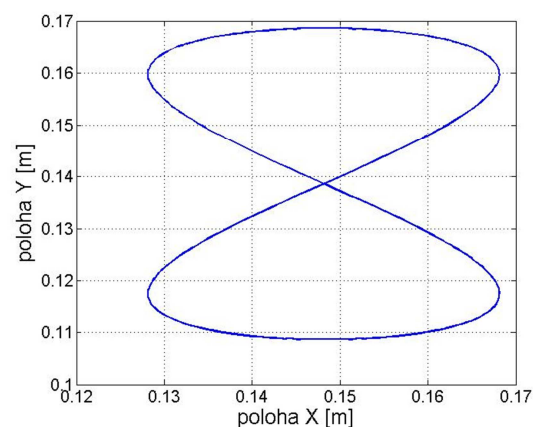
MSC Adams



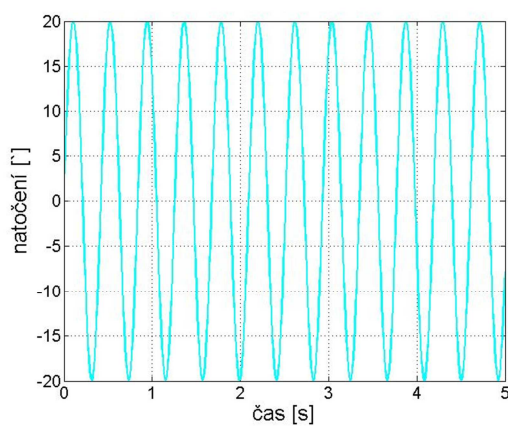
Graf 6.2 Poloha těžiště pracovní plošiny



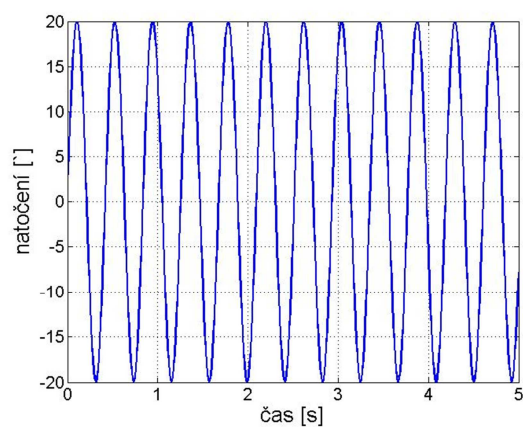
Graf 6.3 Poloha těžiště pracovní plošiny



Graf 6.4 Poloha těžiště pracovní plošiny

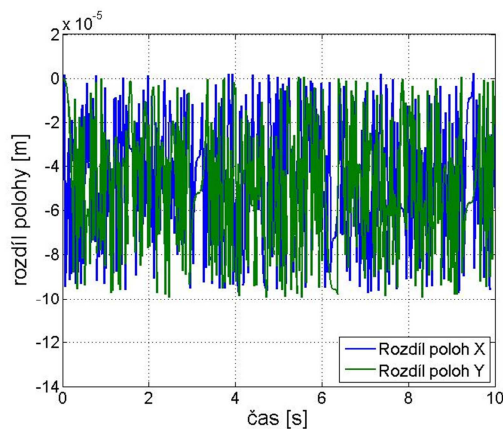


Graf 6.5 Natočení pracovní plošiny

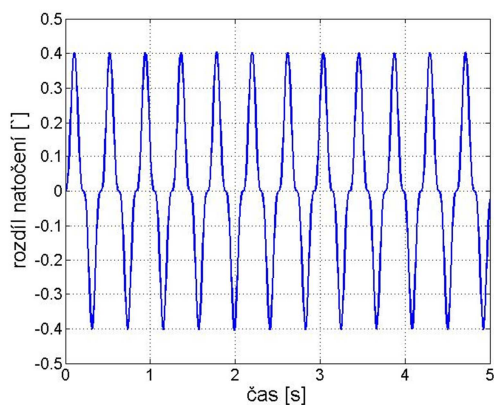


Graf 6.6 Natočení pracovní plošiny

Pro srovnání výsledných hodnot, byly vytvořeny grafy, které znázorňují rozdíly mezi výslednými hodnotami obou programů v čase. Snímané hodnoty jsou nastaveny po 0,002s.



Graf 6.7 Rozdíl aktuální polohy těžiště pracovní plošiny



Graf 6.8 Rozdíl natočení pracovní plošiny

Z grafu 6.7 je vidět, že maximální rozdíl poloh je $-1 \times 10^{-4} m$ v porovnání s původní polohou je to $6,75 \times 10^{-3} \%$. V grafu 6.8 je vidět rozdíl natočení. Maximální rozdíl je $0,4^\circ$, tj. 2%.

7. Simulace inverzní kinematiky

Pro použití inverzní kinematiky v modelu bylo nejprve zapotřebí upravit obecné rovnice inverzní kinematiky (4.5), (4.6), (4.7). Od výsledných délek ramen musely však být odečteny jejich délky odpovídající výchozí poloze a natočení těžiště plošiny. Takto je potom obdržena požadovaná délka vysunutí nebo zasunutí ramena nutná pro docílení výsledné pozice pracovní plošiny.

$$\Delta L_1 = \sqrt{(x_T - e \cos(\varphi + \alpha))^2 + (y_T - e \sin(\varphi + \alpha))^2} - \sqrt{(x - e \cos(\varphi' + \alpha))^2 + (y - e \sin(\varphi' + \alpha))^2} \quad (7.1)$$

$$\Delta L_2 = \sqrt{(x_Q - (x_T - e \cos(\varphi + \alpha)) - h_2 \cos(\varphi))^2 + ((y_T - e \sin(\varphi + \alpha)) - y_Q + h_2 \sin(\varphi))^2} - \sqrt{(x_Q - (x - e \cos(\varphi' + \alpha)) - h_2 \cos(\varphi'))^2 + ((y - e \sin(\varphi' + \alpha)) - y_Q + h_2 \sin(\varphi'))^2} \quad (7.2)$$

$$\Delta L_3 = \sqrt{((x_T - e \cos(\varphi + \alpha)) - x_R + h_3 \cos(\varphi + \beta))^2 + (y_T - e \sin(\varphi + \alpha)) - y_R + h_3 \sin(\varphi + \beta))^2} - \sqrt{((x - e \cos(\varphi' + \alpha)) - x_R + h_3 \cos(\varphi' + \beta))^2 + (y - e \sin(\varphi' + \alpha)) - y_R + h_3 \sin(\varphi' + \beta))^2} \quad (7.3)$$

Kde x , y jsou výchozí souřadnice polohy resp. těžiště pracovní plošiny, φ' je výchozí natočení pracovní plošiny.

Pro daný model bylo nutné přiřadit všechny konstrukční parametry a vstupní a výstupní veličiny. Konstrukční veličiny:

$$\alpha = 30^\circ$$

$$\beta = 60^\circ$$

$$h_1 = h_2 = h_3 = 0,05$$

$$x_Q = 0,296$$

$$y_Q = 0$$

$$x_R = 0,271$$

$$y_R = 0,289$$

$$e = \frac{h_1}{2 \cdot \cos(\alpha)}$$

Vstupní veličiny jsou v praxi hodnoty, které požaduje uživatel manipulátoru. Jako vstupní veličiny byly pro simulační účely použity:

$$x_T = 0,2$$

$$y_T = 0,16$$

$$\varphi = 5^\circ$$

Pro výpočet výchozího vysunutí ramene je potřeba ještě definovat výchozí pozici a natočení těžiště pracovní plošiny. Pro simulační účely byly zvoleny tyto hodnoty:

$$x = 0,148$$

$$y = 0,137$$

$$\varphi' = 0^\circ$$

Výstupní veličiny jsou definovány rovnicemi (7.1), (7.2), (7.3). Po dosazení vstupních hodnot do těchto rovnic, vyšla délka vysunutí ramen (záporná hodnota značí zasunutí ramene).

$$\Delta L_1 = 0,0534$$

$$\Delta L_2 = -0,0105$$

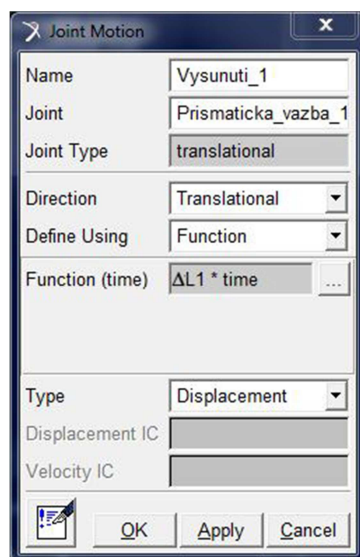
$$\Delta L_3 = -0,0494$$

7.1 Simulace v MSC Adams

Pro použití rovnic inverzní kinematiky v modelu bylo nejprve nutné si stanovit „Design variable“. Jsou to návrhové proměnné, ke kterým můžeme přiřadit jakoukoliv hodnotu. Přiřazené hodnoty byly konstrukční parametry mechanismu, vstupní a výstupní veličiny k proměnným

$$\alpha, \beta, h_1, h_2, h_3, x_Q, y_Q, x_R, y_R, x_T, y_T, e, \varphi, x, y, \varphi'.$$

Při použití inverzní kinematiky je potřeba řídit velikost vysunutí jednotlivých ramen. Toto bylo dosaženo použitím prvku „Translational joint motion“. Prvek byl použit na všechny tři prismatické vazby v modelu. V jeho nastavení (obr. 7.1) byla přiřazena funkce vysunutí závislá na čase $\Delta L_x \cdot time$, kde index x vyjadřuje dané rameno. ΔL_x vyjadřuje výsledné vysunutí, proto musí být čas animace 1s.

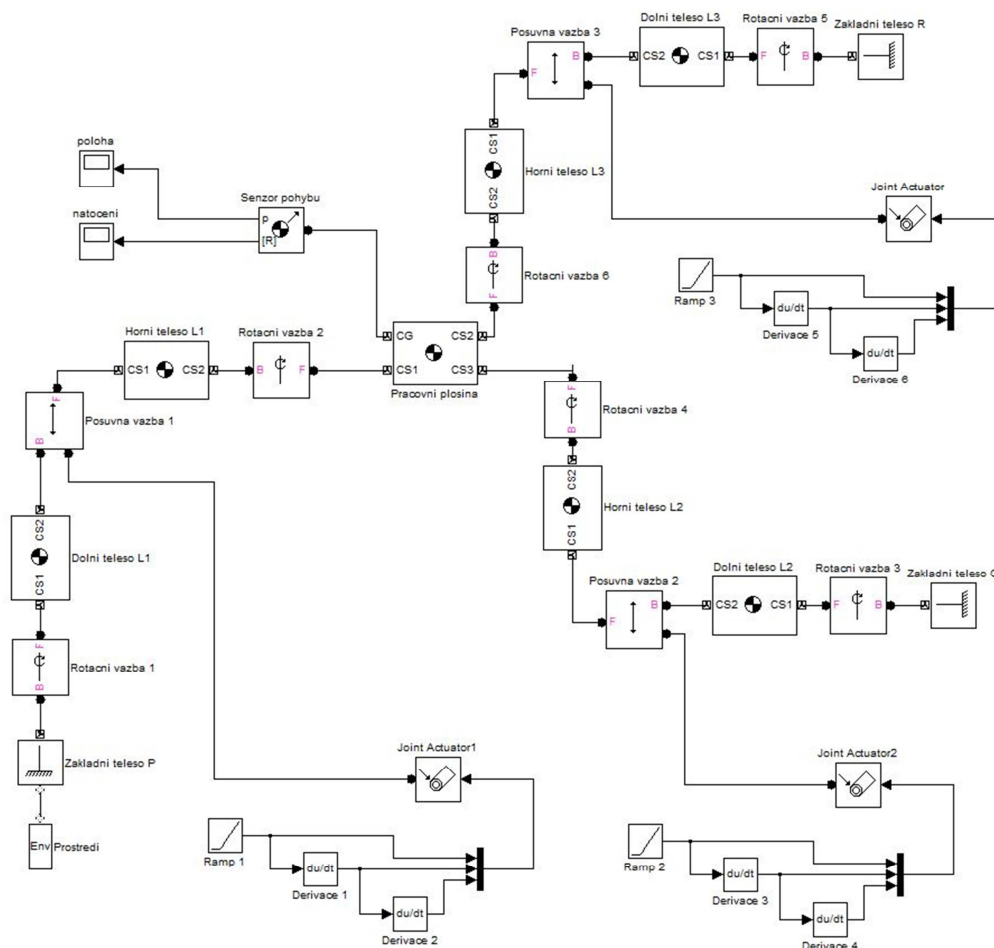


Obr. 7.1 Nastavení prvku Joint motion

7.2 Simulace v MATLAB/SimMechanics

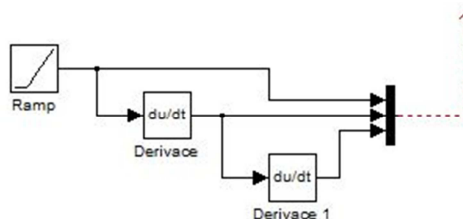
Pro použití inverzní kinematiky bylo nutné upravit blokové schéma mechanismu viz. obr. 7.2. Poté byly přiřazeny konstrukční parametry mechanismu, vstupní a výstupní veličiny k proměnným

$$\alpha, \beta, h_1, h_2, h_3, x_Q, y_Q, x_R, y_R, x_T, y_T, e, \varphi, x, y, \varphi'$$



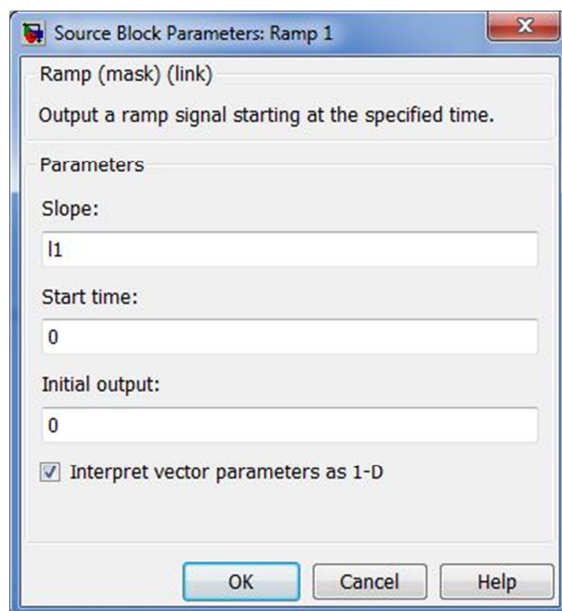
Obr. 7.2 Blokové schéma 3-RPR mechanismu pro simulaci inverzní kinematiky

Na prismatické vazby byl umístěn prvek „Joint actuator“. Pro vstup do aktuátoru jsou potřeba tři veličiny, poloha, rychlost a zrychlení. Tyto další veličiny získáme derivací rovnice polohy. Blokové schéma vstupu je vidět na obr. 7.3.



Obr. 7.3 Blokové schéma vstupu pro simulaci inverzní kinematiky

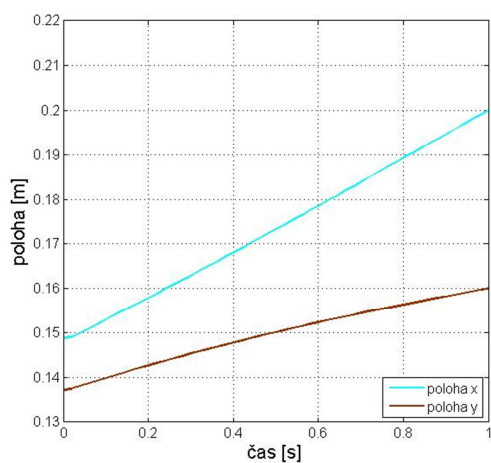
Prvek „Ramp“ docílí lineárního zvětšování vysunutí nebo zasunutí ramene. Nastavení prvku Ramp pro rameno 1 je vidět na obr. 7.4. „Slope“ je maximální hodnota výstupu, tj. funkce výsledného vysunutí ramene. Hodnota 0 v poli „Start time“ a „Initial output“ znamená, že funkce je lineárně rostoucí od 0, až do výsledného vysunutí, od začátku simulace, až do jejího konce. K funkci l_x , kde x vyjadřuje aktuální rameno, jsou přiřazeny rovnice (7.1), (7.2), (7.3).



Obr. 7.4 Nastavení prvku Ramp

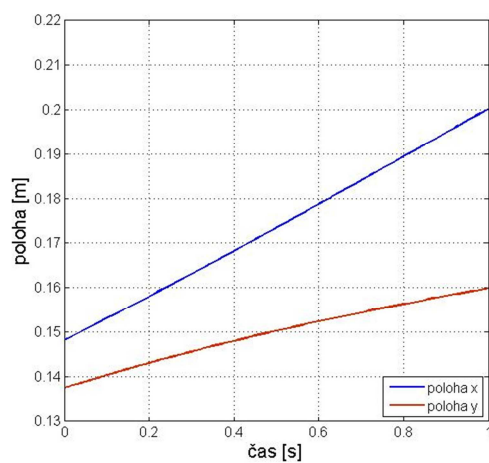
7.3 Porovnávání veličiny

MATLAB/SimMechanics

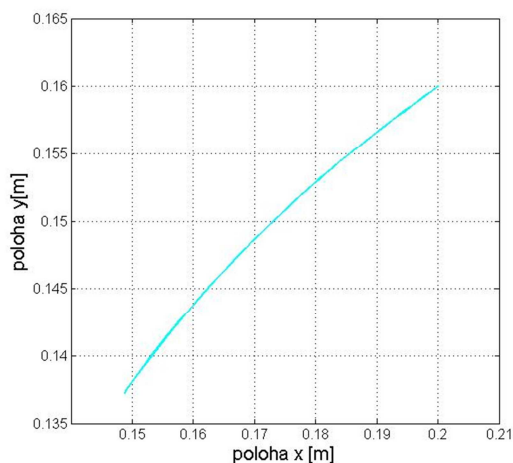


Graf 7.1 poloha těžiště pracovní plošiny

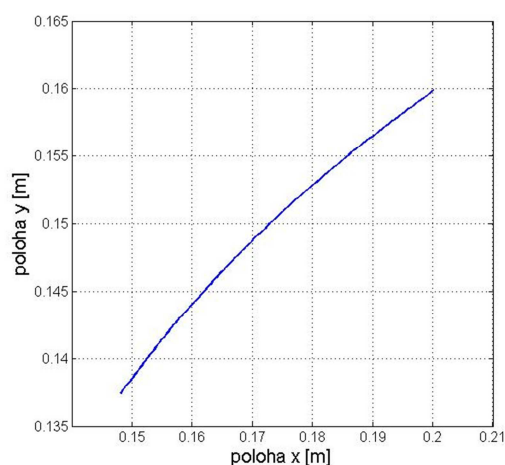
MSC Adams



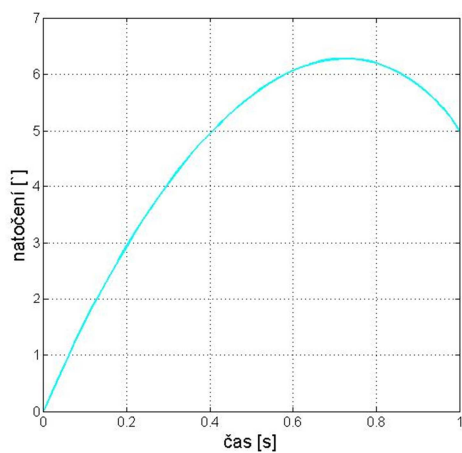
Graf 7.2 poloha těžiště pracovní plošiny



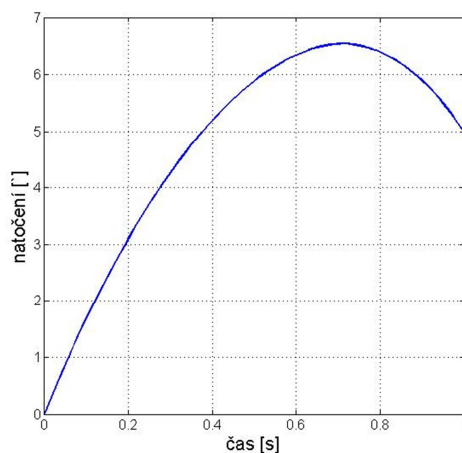
Graf 7.3 poloha těžiště pracovní plošiny



Graf 7.4 poloha těžiště pracovní plošiny

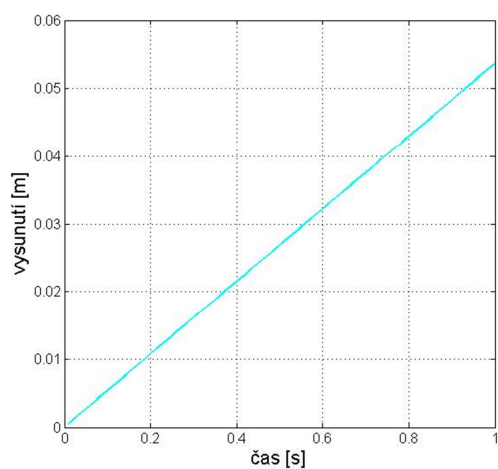


Graf 7.5 natočení pracovní plošiny



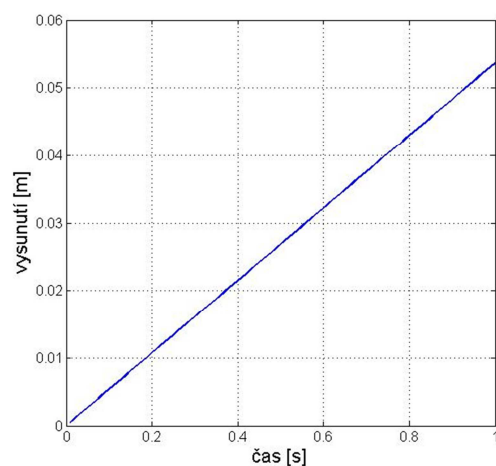
Graf 7.6 natočení pracovní plošiny

MATLAB/SimMechanics

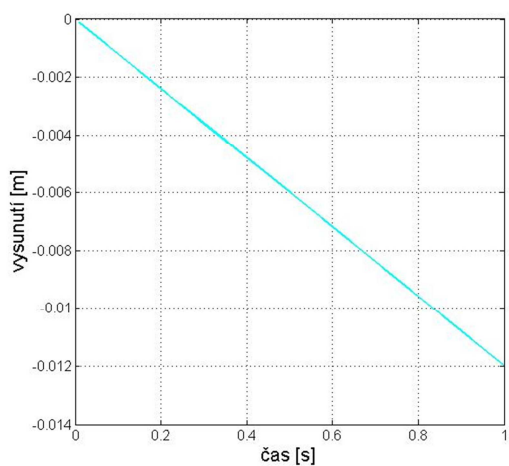


Graf 7.7 vysunutí ramene 1

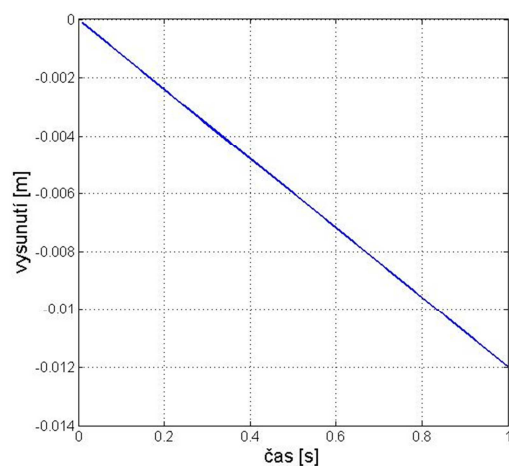
MSC Adams



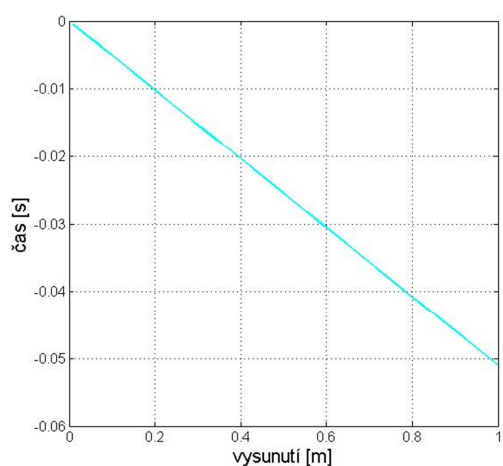
Graf 7.8 vysunutí ramene 1



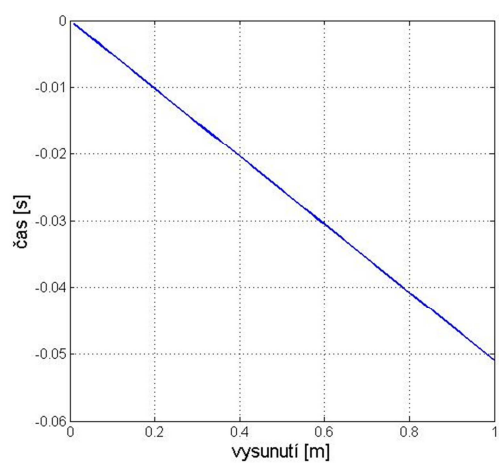
Graf 7.9 vysunutí ramene 2



Graf 7.10 vysunutí ramene 2

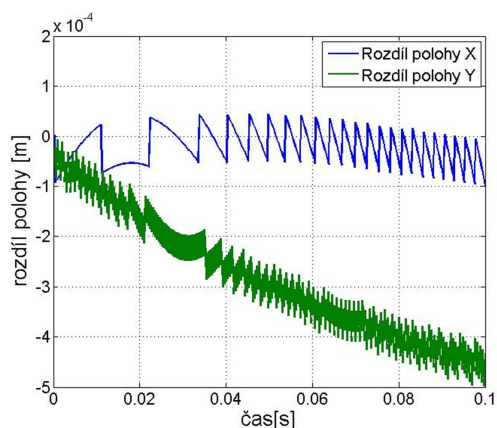


Graf 7.11 vysunutí ramene 3

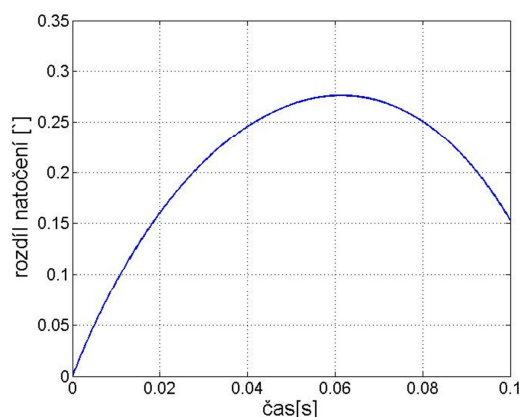


Graf 7.12 vysunutí ramene 3

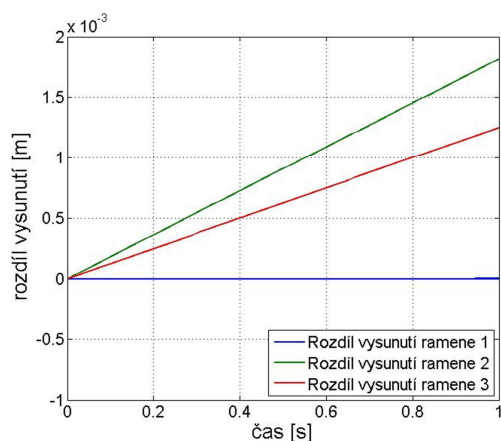
Pro srovnání výsledných hodnot, byly vytvořeny grafy, které znázorňují rozdíly mezi výslednými hodnotami obou programů v čase. Snímané hodnoty jsou nastaveny po 0,0002s.



Graf 7.13 Rozdíl aktuální polohy těžiště pracovní plošiny



Graf 7.14 Rozdíl natočení pracovní plošiny



Graf 7.15 Rozdíl vysunutí jednotlivých ramen

Z grafu 7.13 je vidět, že maximální rozdíl poloh v ose x je $-1 \times 10^{-4} \text{ m}$ a v osy y je $-5 \times 10^{-4} \text{ m}$. Rozdíl tedy odpovídá asi 0,34% výsledné polohy. V grafu 6.8 je vidět rozdíl natočení. Maximální rozdíl je $0,28^\circ$, tj. 4,18% oproti natočení maximálnímu. Graf 7.15 zobrazuje rozdíl vysunutí jednotlivých ramen. Rozdíl výsledného vysunutí ramene 1 je $2,18 \times 10^{-6} \text{ m}$, ramene 2 je $1,25 \times 10^{-3} \text{ m}$ a ramene 3 je $1,82 \times 10^{-3} \text{ m}$.

8. Simulace dynamických vlastností mechanismu

Simulace dynamických vlastností mechanismu vychází z modelu inverzní kinematiky. Byly zachovány všechny parametry modelu inverzní kinematiky, kromě hmotnosti pracovní plošiny, která byla zvětšena na 50kg (simulace zatížení plošiny), a času simulace na $t=0,1s$, při zachování dráhy těžiště pracovní plošiny jako v kapitole 7. Tyto změny byly provedeny z důvodu větších dynamických účinků a názornějšího porovnání obou modelů. Dráha těžiště pracovní plošiny byla z výchozího bodu $[0,148 \ 0,137]$ a výchozího natočení 0° do konečného bodu $[0,2 \ 0,16]$ a konečného natočení 5° po křivce, která je zobrazena v grafu (7.3), (7.4). Délka dráhy byla $d=0,0563$ za čas 0,1. Průměrná rychlost těžiště tedy je $v=0,563$.

Délka vysunutí jednotlivých ramen a rychlosti vysunutí nebo zasunutí jsou:

$$\Delta L_1 = 0,0534 \quad v_1 = 0,534$$

$$\Delta L_2 = -0,0105 \quad v_2 = 0,105$$

$$\Delta L_3 = -0,0494 \quad v_3 = 0,494$$

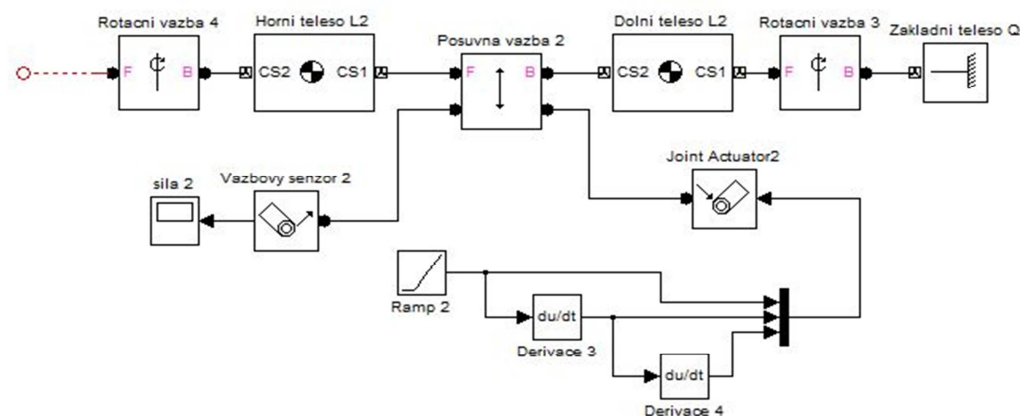
Pro porovnání dynamických vlastností modelů byly analyzovány síly působící v jednotlivých translačních vazbách během pohybu do předepsaného bodu.

8.1 Simulace v MSC Adams

Pro simulaci dynamických sil se mohl použít model z kapitoly 7., jediné změny jsou již zmiňované výše. Dynamická analýza proběhla bez problémů. Průběhy sil působících na translační vazby jsou znázorněny v kapitole 8.3. Poté byly v modulu Adams/PostProcessor vygenerovány grafy jednotlivých sil působících na vazby

8.2 Simulace v MATLAB/SimMechanics

V programu Matlab SimMechanics bylo nutné upravit model, který vycházel z kapitoly 7. Ve vlastnostech translačních vazeb bylo nutné změnit „Number of sensor/actuator ports:“ na hodnotu 2. Poté na nově vzniklý port byl umístěn vazbový senzor. Pro měření celkových sil působících na vazbu bylo nutné zvolit v nastavení senzoru „Computed force“. Na obr. 8.1 je vidět jedno upravené rameno.

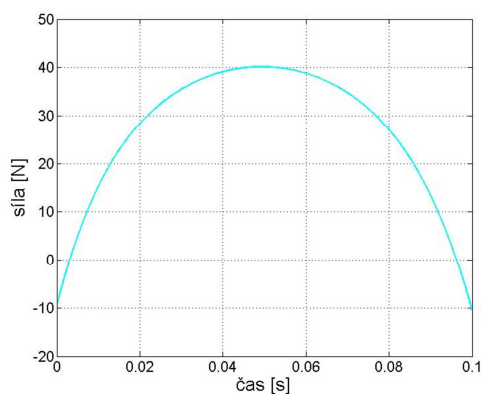


Obr. 8.1 Blokové schéma jednoho ramene pro simulaci dynamických sil

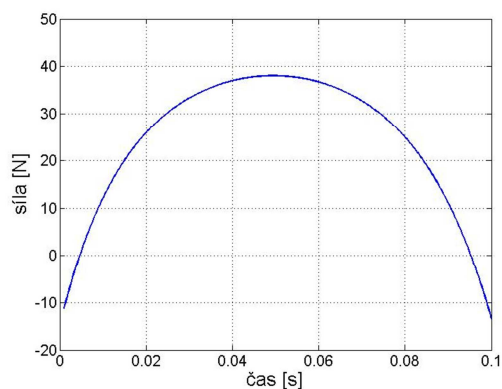
8.3 Porovnání výsledných veličin.

MATLAB/SimMechanics

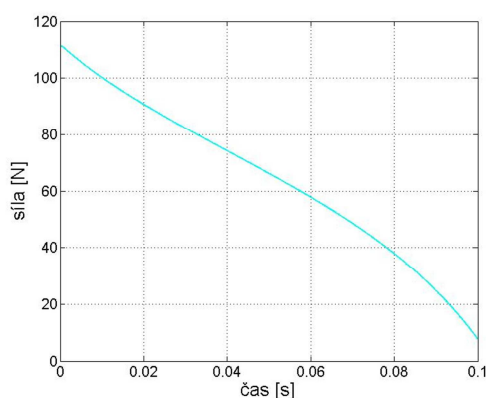
MSC Adams



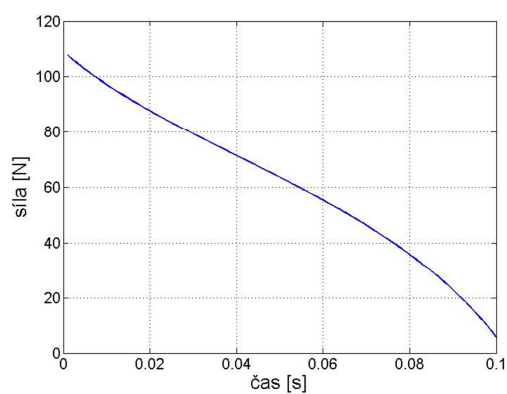
Graf 8.1 Síla v translační vazbě 1



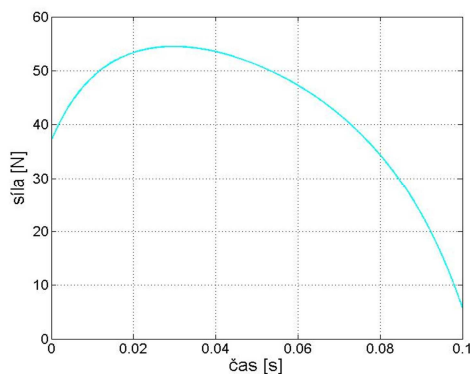
Graf 8.2 Síla v translační vazbě 1



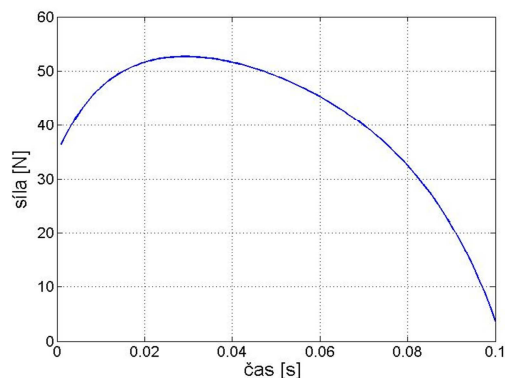
Graf 8.3 Síla v translační vazbě 2



Graf 8.4 Síla v translační vazbě 2

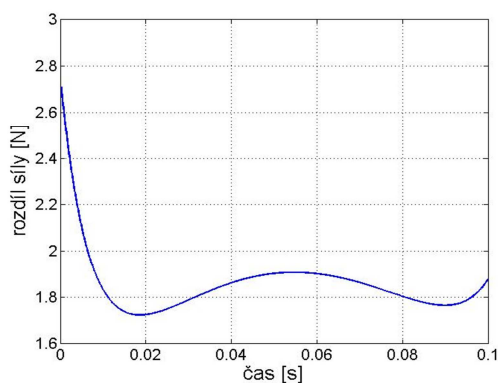


Graf 8.5 Síla v translační vazbě 3

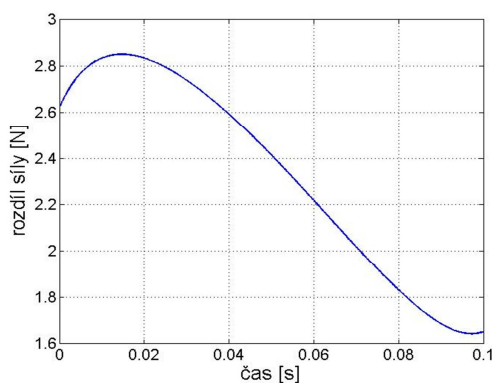


Graf 8.6 Síla v translační vazbě 3

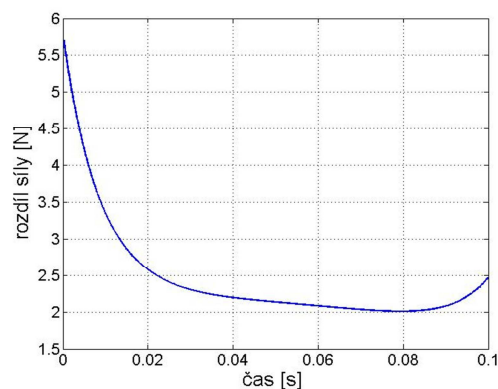
Pro srovnání výsledných hodnot, byly vytvořeny grafy, které znázorňují rozdíly mezi výslednými hodnotami obou programů v čase. Snímané hodnoty jsou nastaveny po 0,002s.



Graf 8.7 Rozdíl síly v translační vazbě 1



Graf 8.8 Rozdíl síly v translační vazbě 2



Graf 8.9 Rozdíl síly v translační vazbě 3

Průběh rozdílu síly v translační vazbě 1 je vidět v grafu 8.7, kde maximální rozdíl je 2,71N tj. asi 6,78% z maximální síly ve vazbě. Rozdíl síly v translační vazbě 2 je v grafu 8.8, kde max. rozdíl je 2,85N tj. 2,56% z maximální síly ve vazbě a v translační vazbě 3 je rozdíl sil v grafu 8.9, kde max. rozdíl je 5,70N, tj. asi 9,9% z maximální síly ve vazbě.

9. Závěr

Předložená práce prezentuje výsledky simulací paralelního mechanismu typu 3-RPR v souladu s cíli zadání.

K dosažení práce bylo nutné realizovat následující kroky:

- Odvození základních kinematických rovnic pro paralelní mechanismus 3-RPR, které slouží jako analytický popis geometrie mechanismu. Tyto rovnice byly základem pro odvození rovnic inverzní kinematiky.
- Vytvoření simulačního modelu v programu MSC Adams. Základem byl 3D model mechanismu vytvořený v SolidWorks.
- Sjednocení dostupného modelu v MATLAB/SimMechanics s modelem vytvořeným v MSC Adams.
- Simulování modelu kinematiky a dynamiky v obou programech.
- Simulační porovnání chování obou modelů

Z předložené práce vyplývá:

- Simulace kinematických modelů proběhla v obou programech v podstatě shodně. Chování obou modelů popisují grafy v kapitole 6.3. Maximální rozdíl poloh je $-1 \times 10^{-5} m$.
- Simulace inverzní kinematiky realizovaná v kapitole 7. je plně funkční. Ve výstupních grafech v kapitole 7.3 je patrný drobný rozdíl a to pro křivku dráhy, kterou opisuje těžiště. Rozdíly mezi jednotlivými aktuálními polohami nejsou větší než $-5 \times 10^{-4} m$. Rozdíl v hodnotách je patrný i v grafech natočení plošiny, kde maximální rozdíl mezi natočením je $0,28^\circ$ a výsledný rozdíl natočení je $0,15^\circ$. Rozdíl mezi výslednými pozicemi těžiště pracovní plošiny je $5.1 \times 10^{-4} m$. Poznamenejme, že rovnice inverzní kinematiky se používá v praxi pro řízení polohy mechanismu.
- Simulace dynamických vlastností modelu slouží pro určení silových poměrů v mechanismu. Díky tomu jsme schopni určit maximální síly působící na mechanismus a poté případně upravit jeho konstrukční návrh s ohledem na maximální napětí a bezpečnost v jednotlivých členech. V případě řešeného příkladu byly pro daný pohyb analyzovány síly v translačních vazbách. Tato analýza se v praxi používá zejména pro dimenzování pohonů. Výstupní grafy sil působících na translační vazby jsou uvedeny v kapitole 8.3. Mezi grafy jsou nepatrné rozdíly ve velikostech sil. Všechny rozdíly jsou do 10% maximální síly působící na vazbu. Největší rozdíl v hodnotách je vždy na počátku simulace. To je pravděpodobně způsobeno citlivostí řešiče Matlabu na počáteční podmínky simulace.

Z porovnání výstupů obou modelů jak pro analýzu kinematiky tak dynamiky vyplývá, že výstupní hodnoty jsou v dobré shodě. Nepatrné rozdíly byly pravděpodobně způsobeny použitím řešiče s proměnnou délkou kroku, která je volena každým z obou programů různě.

Sestavené modely mohou být použity k výuce předmětů Kinematika a Dynamika.

10. Odkazy

- [1] Gosselin, C.: Parallel computational algorithms for the kinematics and dynamics of planar and spatial parallel manipulators. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 118(1) (1996), p. 22-28
- [2] Merlet, J. P.: *Parallel robots, 2nd Edition*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2005
- [3] Wesley K. Harris thesis Optimal Design of a Planar 3-RPR Haptic Interface Based on Manipulability.
- [4] Dasgupta, B., Choudhury, P.: A general strategy based on the Newton-Euler approach for the dynamic formulation of parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 34(6) (1999), p. 801 - 824
- [5] Miller, K.: Dynamics of the New UWA Robot. Proceedings of Australian Conference on Robotics and Automation, Sydney, 2001
- [6] Cheng, H., Yiu, Y., Li, Z.: Dynamics and Control of Redundantly Actuated Parallel Manipulators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 8(4) (2003), p. 483 – 491
- [7] Liu, M., Li, C., Li, Ch.: Dynamics Analysis of the Gough–Stewart Platform Manipulator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 16(1) (2000), p. 94 – 98
- [8] Codourey, A., Burdet, E.: A Body-oriented Method for Finding a Linear Form of the Dynamic Equation of Fully Parallel Robots. *Robotics and Automation*, Vol. 2 (1997), p. 1612 – 1618
- [9] BŘEZINA, L. Singulární stavy paralelních mechanismů. Brno Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006.

11. Použité jednotky a veličiny

- A...poloha rotační vazby mezi pracovní plošinou a horním ramenem [m]
B...poloha rotační vazby mezi pracovní plošinou a horním ramenem [m]
C...poloha rotační vazby mezi pracovní plošinou a horním ramenem [m]
P...poloha rotační vazby mezi základním tělesem a dolním ramenem [m]
Q...poloha rotační vazby mezi základním tělesem a dolním ramenem [m]
R...poloha rotační vazby mezi základním tělesem a dolním ramenem [m]
T... těžiště pracovní plošiny [m]
 α ...konstrukční úhel pracovní plošiny [$^{\circ}$]
 β ... konstrukční úhel pracovní plošiny
 φ ... úhel natočení pracovní plošiny [$^{\circ}$]
 h_1 ...délka hrany pracovní plošiny [m]
 h_2 ...délka hrany pracovní plošiny [m]
 h_3 ...délka hrany pracovní plošiny [m]
 l ... délka jedné části ramene [m]
 e ... konstrukční vzdálenost mezi bodem A a těžištěm pracovní plošiny [m]
 i ... počet stupňů volnosti [1]
 i_v ... počet stupňů zastupující prostor [1]
 n_t ... počet těles [1]
 ξ_j ... počet stupňů volnosti odebraných jednotlivými vazbami [1]
 ξ_p ... počet stupňů volnosti odebraných posuvnou vazbou [1]
 ξ_r ... počet stupňů volnosti odebraných rotační vazbou [1]
 x_T ... x-ová souřadnice bodu T [m]
 y_T ... y-ová souřadnice bodu T [m]
 x_Q ... x-ová souřadnice bodu Q [m]
 y_Q ... y-ová souřadnice bodu Q [m]
 x_R ... x-ová souřadnice bodu R [m]
 y_R ... y-ová souřadnice bodu R [m]
 L_1 ...délka ramene 1 [m]
 L_2 ...délka ramene 2 [m]
 L_3 ...délka ramene 3 [m]
 $\varnothing d$... vnější průměr horní části ramene, vnitřní průměr dolní části ramene [m]
 $\varnothing D$... vnější průměr dolní části ramene [m]

ρ ... hustota ocele [m^3/kg]
SM... setrvačný moment [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
M... hmotnost [kg]
O(t)... výstup z prvku sinewave [1]
Amp... amplituda v prvku sinewave [1]
Freq... frekvence sinusu v prvku sinewave [1]
t... čas simulace [s]
Phase... posunutí sinusu v prvku sinewave [1]
 ΔL_1 ... vysunutí ramene 1 [m]
 ΔL_2 ... vysunutí ramene 2 [m]
 ΔL_3 ... vysunutí ramene 3 [m]
d... délka dráhy těžiště [m]
v...průměrná rychlost pohybu těžiště [m/s]
 v_1 ...rychlost vysunutí ramene 1 [m/s]
 v_2 ...rychlost vysunutí ramene 2 [m/s]
 v_3 ...rychlost vysunutí ramene 3 [m/s]
x... výchozí x-ová souřadnice poloha těžiště [m]
y... výchozí y-ová souřadnice poloha těžiště [m]
 φ ... výchozí úhel natočení pracovní plošiny [°]
time... čas animace [s]